

УДК 534.8+620

PACS: 43.60.+d

Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT при многократном отражении эхосигналов от границ цилиндрического объекта контроля

Базулин Е.Г.

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»

123458, Москва, ул. Твардовского, д. 8, Технопарк «Строгино»

E-mail: bazulin@echoplus.ru

В статье рассмотрен модифицированный метод комбинированного SAFT (C-SAFT) для восстановления изображения отражателей, учитывающий многократное отражение импульса от границ стенки цилиндрического объекта контроля. Для проверки работоспособности предложенного алгоритма восстановлены изображения трещины по эхосигналам, рассчитанным в программе CIVA для моделирования распространения и рассеивания ультразвуковых импульсов. В модельном эксперименте показано, что учёт изменения фазы импульса при отражении от границ объекта контроля для разных углов падения поперечной волны в алгоритме восстановления изображения, повышает фронтальную разрешающую способность более чем в два раза. Учёт пяти отражений от границ объекта контроля позволил получить изображения отражателей методом M-C-SAFT по многим акустическим схемам. По полученным изображениям можно определить тип дефектов, их размеры и расположение по толщине стенки трубопровода диаметром 720 мм.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, антенные решётки, двойное сканирование, FMC, тройное сканирование, цифровая фокусировка антенной (ЦФА), C-SAFT, TFM.

1. Введение

Идеальные условия проведения ультразвукового контроля, когда обеспечен надёжный акустический контакт, а поверхность объекта контроля представляет собой плоскость, на практике встречается далеко не всегда. Ситуация нередко осложняется и тем, то что валик усиления сварного соединения или иные конструктивные особенности не позволяют провести сканирование преобразователем или антенной решёткой в пределах необходимой пространственной апертуры. При контроле продольных сварных соеди-

нений трубопроводов возникает необходимость учесть то обстоятельство, что, во-первых, ультразвук вводится не через плоскую, а через цилиндрическую поверхность, и, во-вторых, многократные отражения импульса происходят от цилиндрических поверхностей. Активное внедрение приборов для ультразвукового неразрушающего контроля на основе технологии фазированных антенных решёток (ФАР-дефектоскопы) [1], хоть и уменьшило остроту перечисленных проблем, но не устранило их полностью. Все современные ФАР-дефектоскопы позволяют рассчитывать законы фокусировки не только для плоскости, но и для цилиндрической поверхности или для поверхности «произвольной» формы [2, 3, 4]. Под «произвольной» формой подразумевается форма поверхности, допускающая применение лучевой теории распространения звука [11]. Многие ФАР-дефектоскопы позволяют получать изображения отражателей с учётом однократного или двукратного отражения лучей от неровных границ.

Существует альтернативный подход восстановления изображения отражателей с применением антенных решёток. На первом этапе регистрируются эхосигналы, излученные и принятые всеми парами элементов антенной решётки, так называемый **режим двойного сканирования** [5]. В статье [6] регистрация эхосигналов методом двойного сканирования называется **Full Matrix Capture (FMC)**. На втором этапе восстановить изображение отражателей по измеренным эхосигналам можно методом **комбинированного SAFT (C-SAFT)** [7], который легко модифицируется для учёта многолучевого распространения ультразвука в объекте контроля с неровными границами. В зарубежной литературе алгоритм C-SAFT называется **Total Focusing Method (TFM)** [6]. Авторы статьи [8] регистрацию эхосигналов в режиме двойного сканирования и получение изображения методом C-SAFT предлагают называть цифровой фокусировкой антенной решётки (ЦФА). Приборы, формирующие изображение по такому принципу, будем называть ЦФА-дефектоскопами [9, 2]. Сравнительный анализ свойств ФАР-дефектоскопов и ЦФА-дефектоскопов приведён в работах [8, 10].

Однако, рассмотренные ФАР- и ЦФА-дефектоскопы не позволяют учитывать произвольное число отражений от границ объекта контроля, как правило, можно учесть только два отражения. Кроме того, из технических описаний дефектоскопов, не понятно учитывается ли в алгоритме формирования изображения изменение фазы импульса при отражении от границ объекта контроля при разных углах падения поперечной волны. Поэтому разработка алгоритма, учитывающего произвольное количество отражений с учётом изменения фазы при отражении от границ объекта контроля, является актуальной задачей для автоматизированного неразрушающего ультразвукового контроля.

2. Метод C-SAFT с учётом многократных отражений от границ объекта контроля

Решение обратной задачи рассеивания заключается в том, чтобы по известным источникам поля $q(\mathbf{r}_t, t)$, расположенным в области S_t , и по измеренному в области S_r рассеянному полю $p(\mathbf{r}_r, t)$, найти функцию $\varepsilon(\mathbf{r})$, описывающую отражающие свойства неоднородности в области S .

Один из распространённых методов оценки функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ заключается в корреляционной обработке измеренного поля $p(\mathbf{r}_r, t)$. Пусть решение прямой задачи, то есть расчёт рассеянного поля $p(\mathbf{r}_r, t) = p(\mathbf{r}_r, t; \mathbf{r}_t)$ по известным функциям $q(\mathbf{r}_t, t)$ и $\varepsilon(\mathbf{r})$, в формальном виде можно записать следующим образом

$$p(\mathbf{r}_r, t) = P(\varepsilon(\mathbf{r}), q(\mathbf{r}_t, t)). \quad (1)$$

Помещая точечный отражатель в произвольную точку \mathbf{r}_i , то есть, полагая $\varepsilon(\mathbf{r}) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$, можно оценить вид функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ по корреляционной формуле

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i) = \iiint_{S_t, S_r, S} p(\mathbf{r}_r, t) G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t, t) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_t dt, \quad (2)$$

$$G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t, t) = P(\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i), q(\mathbf{r}_t, t)).$$

Функция $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t, t)$ зависит от формы излучённого импульса $s(t)$ и учитывает все возможные варианты отражения от границ объекта контроля. Если при расчётах функцию $s(t)$ заменить на $\delta(t - t_{\max})$, где t_{\max} – время нарастания импульса, и рассматривать только одну акустическую схему, то выражение (2) превращается в формулу описывающую метод C-SAFT или, в случае $\mathbf{r}_r = \mathbf{r}_t$, метод SAFT

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i) = \iint_{S_t, S_r} p(\mathbf{r}_r, t) \delta(t - t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t) + t_{\max}) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_t dt = \quad (3)$$

$$\iint_{S_t, S_r} p(\mathbf{r}_r, t - t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t) + t_{\max}) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_t,$$

где $t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t)$ – время пробега импульса от излучателя до точки \mathbf{r}_i и к приёмнику для заданной акустической схемы. При таком подходе, задача восстановления изображения отражателей сводится к многократному решению прямой задачи для функции $\varepsilon(\mathbf{r}) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$ при заданном числе отражений от границ объекта контроля при излучении и приёме. Чем точнее удастся решить прямую задачу (1) с учётом эффектов отражения, преломления и трансформации типов волн, анизотропии акустических свойства материалов, затухания звука, наличия нескольких областей с разными акустическими свойствами, тем больше

список объектов контроля, в которых можно восстанавливать высококачественные изображения отражателей.

2.1. Расчёт рассеянного поля от точечного отражателя

Пусть для излучения и приёма ультразвуковых волн используется антенная решётка, установленная на призму с углом наклона β из материала со скоростями продольной и поперечной волны и плотностью $\{c_w, c_{ws}, \rho_w\}$ (Рис. 1). Антенная решётка состоит из $N_t = N_r$ элементов, центры которых расположены на расстоянии Δx друг от друга. Зазор между элементами равен δx , то есть размер элемента антенной решётки равен $\Delta x - \delta x$. Скорости звука и плотность объекта контроля обозначим $\{c, c_s, \rho\}$. Будем считать, что объект контроля может иметь форму цилиндра радиусом R с толщиной стенки равной h . При $R \rightarrow \infty$ объект контроля трансформируется в плиту толщиной h .

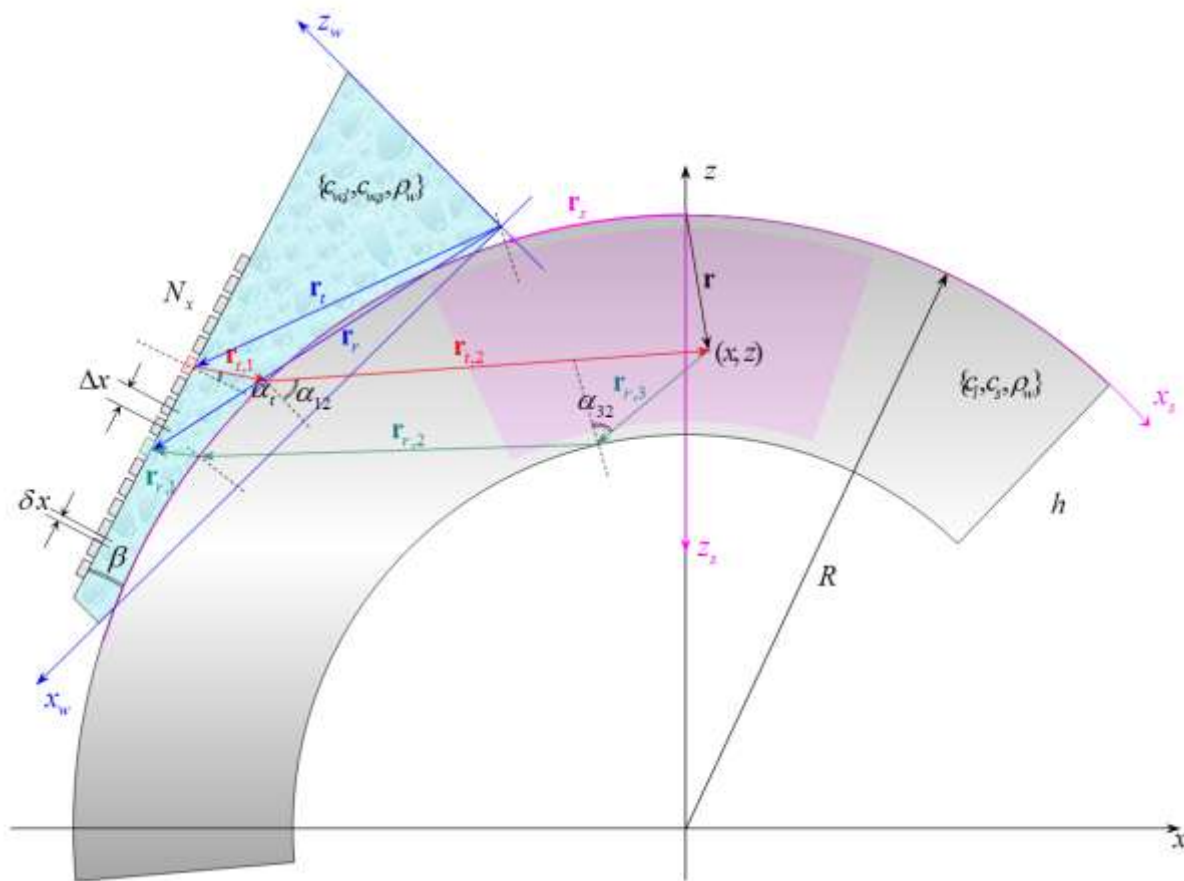


Рис. 1 К расчёту функции $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}, t)$. Пунктирными линиями показаны нормали к поверхности объекта контроля.

Расчёт будем проводить в системе координат xz с центром в центре окружности. При установке призмы на поверхность объекта контроля и описания траектории перемещения преобразователя обычно пользуются системой координат $x_s z_s$, связанной с поверх-

ностью объекта контроля. Ось x_s совпадает с поверхностью объекта контроля и направлена по часовой стрелке, а ось z_s направлена вглубь образца и её центр совпадает с поверхностью объекта контроля. При $R \rightarrow \infty$ необходимость пользоваться системой координат xz отпадает, и все расчёты можно проводить в системе координат $x_s z_s$. Местоположения излучателей и приёмников в системе координат $x_w z_w$ задаются векторами \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_r относительно передней грани призмы, отмеченными на Рис. 1 стрелками синего цвета. Переднее ребро призмы смещено относительно системы координат $x_s z_s$ на величину $\mathbf{r}_s = (x_s, 0)$. Антенная решётка с одним элементом $N_t = N_r = 1$ может рассматриваться как одноэлементный преобразователь, координаты которого определяются вектором \mathbf{r}_s .

Для того чтобы в формуле (2) определить функцию $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t, t)$, необходимо рассчитать поле в области приёма S_r при расположении точечного отражателя в произвольной точке области восстановления изображений (ОВИ), отмеченной на Рис. 1 частью кольца розового цвета, при размещении излучателя в точке \mathbf{r}_i области S_t . Траекторию, по которой распространяется импульс при излучении (на Рис. 1 показана стрелками красного цвета), можно описать в виде последовательности векторов $\{\mathbf{r}_t\} = \{\mathbf{r}_{t,1}, \mathbf{r}_{t,2}, \dots, \mathbf{r}_{t,m_t+1}\}$, где m_t – число отражений от границ образца, а при приёме – в виде последовательности $\{\mathbf{r}_r\} = \{\mathbf{r}_{r,1}, \mathbf{r}_{r,2}, \dots, \mathbf{r}_{r,m_r+1}\}$, где m_r – число отражений от границ образца при приёме (на Рис. 1 траектория показана стрелками зелёного цвета). Первый вектор в такой последовательности всегда соответствует пути распространения звука в призме или иммерсионной среде. Скорость распространения импульса вдоль трассы при излучении задаётся списком $\{c_t\}_{m_t} = \{c_{t,1}, c_{t,2}, \dots, c_{t,m_t+1}\}$, а при приёме – $\{c_r\}_{m_r} = \{c_{r,1}, c_{r,2}, \dots, c_{r,m_r+1}\}$. Первый элемент в этих списках это скорость продольной волны $c_{w,l}$ в призме. Остальные элементы списка могут принимать значение, либо продольной c_l , либо поперечной c_s скорости звука в объекте контроля, что позволяет учитывать эффект трансформации типа волны при отражении от границ и от отражателя. Минимально возможный список скоростей для случая $m_t = 0$ или $m_r = 0$ имеет вид $\{c_t\}_0 = \{c_{w,l}, c_s\}$ или $\{c_r\}_0 = \{c_{w,l}, c_s\}$ и соответствует варианту работы на прямом луче на поперечной волне.

Чтобы определить функцию $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t; \{c_t\}_{m_t})$ при излучении для m_t отражений от границ объекта контроля и функцию $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t; \{c_r\}_{m_r})$ для m_r отражений при приёме, можно воспользоваться приближением геометрической оптики [11]. Так как размеры элементов антенной решётки соизмеримы с длиной волны, то будем рассматривать их как точечные

излучатели-приёмники с диаграммой направленности в призме $\Theta(\alpha)$, где α_t, α_r – угол луча к нормали пьезоэлемента излучателя или приёмника. С учётом этих приближений функции $G(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i, t; \{c_t\}_{m_t})$ и $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t; \{c_r\}_{m_r})$ можно записать в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} G(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i, t; \{c_t\}_{m_t}) = A(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i; \{c_t\}_{m_t}) s(t - t_t(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i; \{c_t\}_{m_t})), \\ t_t(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i; \{c_t\}_{m_t}) = \sum_{n=1}^{m_t+1} \frac{|\mathbf{r}_{t,n}|}{c_n}, \quad A(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i; \{c_t\}_{m_t}) = \Theta(\alpha_t) D_{w,o}(\alpha_{12}; c_{w,l}, c_{t,1}) \frac{\prod_{n=2}^{m_t} V(\alpha_n; c_{t,n}, c_{t,n+1})}{R(\{\mathbf{r}_t\}, \{c_t\}_{m_t})}, \\ G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t; \{c_r\}_{m_r}) = A(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i; \{c_r\}_{m_r}) s(t - t_r(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i; \{c_r\}_{m_r})), \\ t_r(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i; \{c_r\}_{m_r}) = \sum_{n=1}^{m_r+1} \frac{|\mathbf{r}_{r,n}|}{c_n}, \quad A(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i; \{c_r\}_{m_r}) = \Theta(\alpha_r) D_{o,w}(\alpha_{12}; c_{w,l}, c_{r,1}) \frac{\prod_{n=2}^{m_r} V(\alpha_n; c_{r,n}, c_{r,n+1})}{R(\{\mathbf{r}_r\}, \{c_r\}_{m_r})}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где $s(t)$ – форма излучённого импульса, $t_t(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i; \{c_t\}_{m_t})$ и $t_r(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i; \{c_r\}_{m_r})$ – времена пробега импульса по траектории излучения $\{\mathbf{r}_t\}$ и приёма $\{\mathbf{r}_r\}$, $D_{w,o}(\alpha_{12}; c_{w,l}, c_{t,1})$ и $D_{o,w}(\alpha_{12}; c_{w,l}, c_{r,1})$ – коэффициенты прозрачности по давлению для угла преломления α_{12} при прохождении волны из призмы в объект контроля и обратно для заданной пары скоростей звука $(c_{w,l}, c_{t,1})$ или $(c_{w,l}, c_{r,1})$ (см. Рис. 1). Символом $V(\alpha_n; c_{t,n}, c_{t,n+1})$ обозначен комплексный коэффициент отражения от границы объекта контроля, зависящий от типа падающей и отражённой волны $(c_{t,n}, c_{t,n+1})$ для отражения с номером n . Изменение амплитуды импульса описывается функцией расходимости лучей $R(\{\mathbf{r}\}, \{c\})$, вид которой определяется из предположения, что поток энергии в лучевой трубке постоянен. Один из вариантов его расчёта совпадает с формулой расчёта положения мнимой пьезопластины [12]. Для каждой границы $(c_{t,n}, c_{t,n+1})$, на которой меняется скорость распространения звука, модуль расстояния в рекуррентной форме записывается следующим образом

$$|\mathbf{r}_{n+1}| = |\mathbf{r}_{n+1}| + |\mathbf{r}_n| \frac{c_{n+1} \cos \alpha_{n+1}}{c_n \cos \alpha_n}. \quad (5)$$

Это позволит записать для излучения и приёма следующие формулы

$$R(\{\mathbf{r}\}, \{c_t\}_{m_t}) = |\mathbf{r}_{m_t}|, \quad R(\{\mathbf{r}\}, \{c_r\}_{m_r}) = |\mathbf{r}_{m_r}|.$$

Таким образом, для расчёта элементов функции $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t)$ в уравнении (2) можно воспользоваться формулой (4) и записать

$$G(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t; \{c_t\}, \{c_r\}) = A(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i; \{c_t\}) A(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i; \{c_r\}) s(t - t_t(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i; \{c_t\}) - t_r(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i; \{c_r\})). \quad (6)$$

В этой формуле нет множителя, описывающего отражение падающей волны от точечного отражателя, тип которого на практике неизвестен, и это является принципиальным ограничением такого простого алгоритма.

Для описания акустических схем с отражением ультразвуковых импульсов от дна и поверхности объекта контроля будем пользоваться следующими обозначениями: такое событие, как преломление на поверхности или отражение от поверхности, будем обозначать буквой **T**, а буквой **B** будем обозначать отражение от дна. Тип волны после события будем обозначать буквами **L** (продольная) и **S** (поперечная). Запись **T(S)-T(L)** обозначает обычный прямой луч на поперечной волне при излучении и с приёмом на прямом луче, но уже продольной волны ($m_i = 0, m_r = 0$). Схема **TB(LL)-TBT(SSS)** описывает ситуацию, когда при излучении рассматриваются лучи однократно отраженные на продольной волне, а при приеме – двукратно отраженные на поперечной волне ($m_i = 1, m_r = 2$); акустическая схема **T(L)-TB(SL)** соответствует схеме называемой «самотандем» [12] ($m_i = 0, m_r = 1$). На Рис. 1 представлен ход лучей соответствующий акустической схеме **T(S)-TB(SS)**, а на Рис. 2 показан результат расчёта траектории при отражении от цилиндрического отверстия в трубе толщиной 9 мм и радиусом кривизны 360 мм для акустической схемы ($m_i = 7, m_r = 4$). Линиями красного цвета обозначена траектория распространения импульса при излучении импульса, а линиями зелёного цвета обозначена траектория при распространении импульса после отражения от отверстия до точки приёма. Если линия сплошная то на этом участке распространяется поперечная волна, а если пунктирная, то продольная. Стрелками синего цвета отмечены нормали к границам объекта контроля.

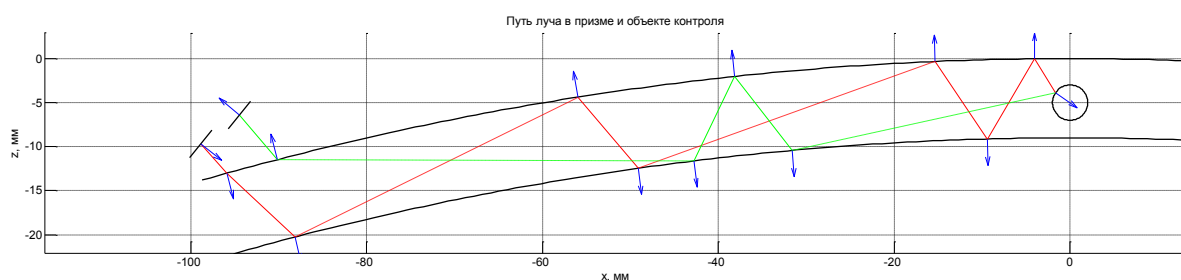


Рис. 2 Пример расчёта траектории для акустической схемы ($m_i = 7, m_r = 4$) с учётом трансформации типа волны.

С помощью формул (4) и (6) можно рассчитать поле, рассеянное отражателями $\varepsilon(\mathbf{r})$ известной формы для заданной функции источников $q(\mathbf{r}_i, t)$, в приближении Кирхгофа. Для этого в формулы (4) и (6) нужно добавить интегрирование по вектору \mathbf{r}_i в преде-

лах «освещённой» поверхности отражателя и задать коэффициент отражения

$V_s(\alpha_s; c_{t,m_t+1}, c_{r,m_r+1})$. Формула (4) не описывает затухание и дисперсию эхосигнала. При необходимости эти эффекты могут быть учтены. В простейшем случае частотно независимое затухание для каждого участка траектории можно описать функцией $e^{-\delta|r|}$. Здесь δ коэффициент затухания в обратных миллиметрах для продольной или поперечной волны для каждого отрезка траектории.

Основной проблемой при расчётах по формуле (4) является определение траекторий лучей при излучении $\{\mathbf{r}_t\} = \{\mathbf{r}_{t,1}, \mathbf{r}_{t,2}, \dots, \mathbf{r}_{t,m_t+1}\}$ и при приёме $\{\mathbf{r}_r\} = \{\mathbf{r}_{r,1}, \mathbf{r}_{r,2}, \dots, \mathbf{r}_{r,m_r+1}\}$. Аналитическое решение для произвольного количества отражений от неровных границ объекта, по-видимому, не существует. Поэтому для определения пути распространения импульсов можно воспользоваться принципом Ферма [13], гласящем, что распространение света или звука в пространстве с заданным распределением скорости $c(x, z)$ из одной точки в другую происходит по кратчайшему оптическому пути, то есть по траектории, вдоль которой свет или звук распространяется за минимальное время. Этот вариационный подход легко позволяет учитывать такие эффекты, как многократные отражения от неровных границ объекта контроля, так и трансформацию типов волн при отражениях и преломлениях на границах разных сред. Его обычно реализуют с помощью итерационной процедуры, что замедляет скорость расчётов. Следует отметить, что применение принципа Ферма вызывает определённые трудности при расчёте траекторий в образце с несколькими областями, в которых скорости звука разные. Так как траектория может сместиться и перестать проходить через область заданную в нулевом приближении, то придётся решать задачу, в которой число неизвестных может меняться от итерации к итерации.

Для обеспечения хорошего акустического контакта при регистрации эхосигналов на цилиндрической поверхности нужно использовать притёртые призмы. Будем считать, что, во-первых, призма притёрта с тем же радиусом, что и объект контроля, и, во-вторых, что центральный луч пересекает максимальную высоту профиля цилиндрической притёртости. Координаты элементов антенной решётки на призме задаются в системе координат x_w, z_w . Стрелу, то есть расстояние от переднего ребра призмы до точки пересечения центрального луча подошвы призмы, обозначим через a_w . Переднее нижнее ребро призмы находится на расстоянии x_s по поверхности от положения с нулевым углом и определяется как точка пересечения поверхности трубы и продолжения радиуса (сиреневая линия на Рис. 1). При сканировании по трубе предполагается, что координаты элементов антенной решётки задаются в системе координат x_s, z_s совпадающей с поверхностью трубы. Поэто-

му нужно пересчитать координаты элементов из точки $(x_{e,w}, z_{e,w})$ системы координат $x_w z_w$ в точку $(x_{e,s}, z_{e,s})$ системы координат $x_s z_s$ по следующим формулам

$$\begin{cases} x_{e,s} = (R \Delta\alpha - a_s) + x_s \\ z_{e,s} = \sqrt{((x_{e,w} - a_w) - R \sin \Delta\alpha)^2 + (z_{e,w} + R (1 - \cos \Delta\alpha))^2} \end{cases},$$

где $a_s = R \arctan \frac{a_w}{R}$, $\Delta\alpha = \arctan \frac{x_{e,w} - a_w}{z_{e,w} + R}$.

Связь между системой координат $x_s z_s$ и системой координат xz , в которой проводятся расчёты, устанавливается следующим образом

$$\begin{cases} x = (R + z_w) \sin(x_w/R), \\ z = (R + z_w) \cos(x_w/R). \end{cases}$$

Следует отметить, что для цилиндрической поверхности регистрации эхосигналов изображение восстанавливается не на прямоугольной, а на цилиндрической сетке, которой соответствует область, отмеченная на Рис. 1 розовым цветом. Тем не менее, изображения в статье будут представлены так, как будто бы объект контроля является пластиной. Если толщина h образца больше чем в пять раз меньше его радиуса R , то ошибкой представления можно пренебречь.

2.2. Выбор независимых и значащих акустических схем

При каждом отражении от границы объекта контроля может происходить трансформация типа падающей волны. Это означает, что при m_i отражениях максимальное число возможных комбинаций списка скоростей $\{c_t\}_{m_i} = \{c_{t,1}, c_{t,2}, \dots, c_{t,m_i+1}\}$ равно 2^{m_i} и учёт всех возможных вариантов скоростей на трассе по формулам (4) и (6) значительно увеличивает время формирования изображения. Однако ситуация значительно упрощается, если принять во внимание следующие два обстоятельства. Во-первых, импульс распространяется за одинаковое время по многим траекториям. Время распространения определяется не порядком следования отрезков траектории с заданными скоростям звука, а зависит от количества отрезков, вдоль которых звук распространяется, либо как продольная волна, либо как поперечная волна. Акустические схемы, которые имеют разные времена распространения импульса вдоль траектории, будем называть **независимыми**. Так для пяти отражений $m_i = 5$ от границ плоскопараллельного образца из возможных 32 путей только 10 будут независимы. Если не рассматривать луч, приходящий к точке «прицеливания» r_i , то время распространения по первым четырём линиям для акустической схеме «LLSS» совпадает с временем пробега для схем «LSSL», «SLLS» и всем тем, где символы «S» и «L»

встречается дважды. Такую схему имеет смысл обозначить как «**2L2S**», то есть независимых акустических схем будет всего четыре. Последний луч, приходящий к точке «прицеливания» r_i особенный, так как он добавляет дополнительные схемы по продольной и поперечной волне. Таким образом, для случая $m_i = 5$ имеет смысл рассматривать только 10 независимых схем, которые перечислены ниже: «**0L4S-L**», «**1L3S-L**», «**2L2S-L**», «**3L1S-L**», «**4L0S-L**», «**0L4S-S**», «**1L3S-S**», «**2L2S-S**», «**3L1S-S**», «**4L0S-S**». Число независимых схем для числа m_i можно рассчитать по формуле

$$N_i = 2m_i. \quad (7)$$

Во-вторых, зависимость коэффициента отражения $V(\alpha_n; c_{i,n}, c_{i,n+1})$ от угла падения приводит к тому, что при многократных отражениях останутся **значимыми** амплитуды эхоимпульсов только тех акустических схем, для которых произведение всех $V(\alpha_n; c_{i,n}, c_{i,n+1})$ имеет максимальное значение. И чем больше число отражений m_i или m_r , тем больше будет разница между амплитудами эхосигналов по разным акустическим схемам. На Рис. 3 показаны амплитуды эхосигналов для всех акустических схем при распространении импульса в плите толщиной 18 мм для случая, когда дефект расположен в точке (0,0, 9.0) мм. При расчётах полагалось, что излучение и приём происходит пьезоэлементом с углом раскрыва 80 градусов расположенным на рексолитовой призме с углом наклона 35 градусов. Призмы с такими углами предназначены для работы на поперечных волнах. На верхнем графике Рис. 3 показаны амплитуды эхосигналов для случая ($m_i = 2$, $m_r = 3$). Первая точка графика соответствует амплитуде импульса распространяющегося как продольная волна, а последняя с номером тридцать два – только как поперечная. Видно, что максимальную амплитуду, как и следовало ожидать, имеет эхосигнал, распространяющийся как поперечная волна. Эта акустическая схема отмечена на графике выносной. Кроме неё из 32 акустических схем заслуживают внимание ещё три акустические схемы, амплитуда которых равна примерно 30% от максимальной амплитуды.

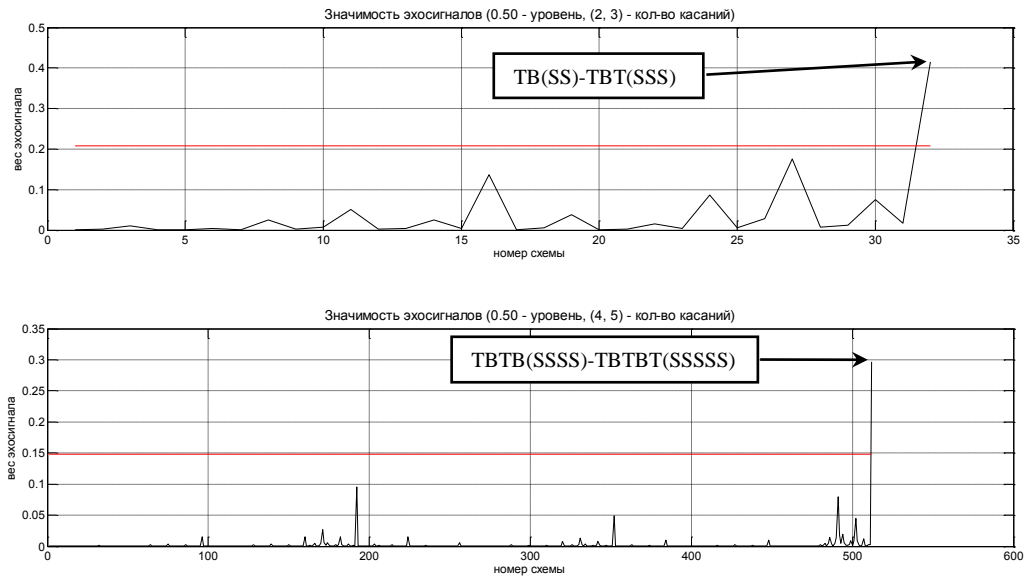


Рис. 3 Амплитуды коэффициента $A(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r; \{c_t\})$ для акустических схем с одним отражением при излучении и двумя отражениями при приёме (вверху) и схемы с тремя отражениями при излучении и четырьмя отражениями при приёме (внизу).

На нижнем графике Рис. 3 показаны амплитуды эхосигналов для акустической схемы ($m_t = 4$, $m_r = 5$) для всех акустических схем. Амплитуда точки с номером пятьсот двенадцать имеет максимальную амплитуду, так как она соответствует случаю, когда импульс распространяется только как поперечная волна. Кроме неё из 512 акустических схем заслуживают внимание ещё четыре акустические схемы, амплитуды эхосигналов которых равны примерно 30% от максимальной амплитуды. Если анализировать акустические схемы до максимальных значений ($m_t = \{1...4\}$, $m_r = \{1...5\}$), то вместо 2 604 всех акустических схем можно ограничиться по уровню 0.5 всего лишь 15-ю схемами, или 39 схемами по уровню 0.2. А если использовать независимые акустические схемы с амплитудой больше уровня 0.1, то их наберётся всего лишь 70. Это принципиально уменьшает количество вычислений при восстановлении изображения. Так как ОВИ может быть достаточно большой, то нужно рассчитать значимые схемы для нескольких точек. Список из независимых и значимых акустических схем состоящий из N_{as} пар списков скоростей

$$\{c_t\}_{m_t} = \{c_{t,1}, c_{t,2}, \dots, c_{t,m_t+1}\} \text{ и } \{c_r\}_{m_r} = \{c_{r,1}, c_{r,2}, \dots, c_{r,m_r+1}\} \text{ обозначим как } \{L_{as}\}.$$

2.3. Учёт фазы при отражении эхосигналов от границ объекта контроля

Коэффициент отражения $V(\alpha_n; c_{t,n}, c_{t,n+1})$ при падении поперечной волны за третьим критическим углом изменяет фазу отражённого импульса, что приводит к эффекту незеркального отражения [12, 12]. Изменение фазы необходимо учитывать в методе SAFT или C-SAFT для их эффективной работы по акустическим схемам с отражением от границ

объекта контроля ($m_t, m_r > 0$). На Рис. 4 показана фаза произведения функции $A(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i; \{c_t\}_{m_t})A(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i; \{c_r\}_{m_r})$ для схемы **TBT(SSS)-TBT(SSS)** (слева) и **TBT(SSS)-TBTB(SSSS)** (справа) при сканировании по поверхности пластины толщиной 18 мм в совмещённом режиме и отражении от отверстия бокового сверления расположенного в точке с координатами (0, 9) мм. Хорошо видно, что в пределах приёмной пространственной апертуры размерами 80 мм фаза сигнала меняется более чем на 360 градусов.

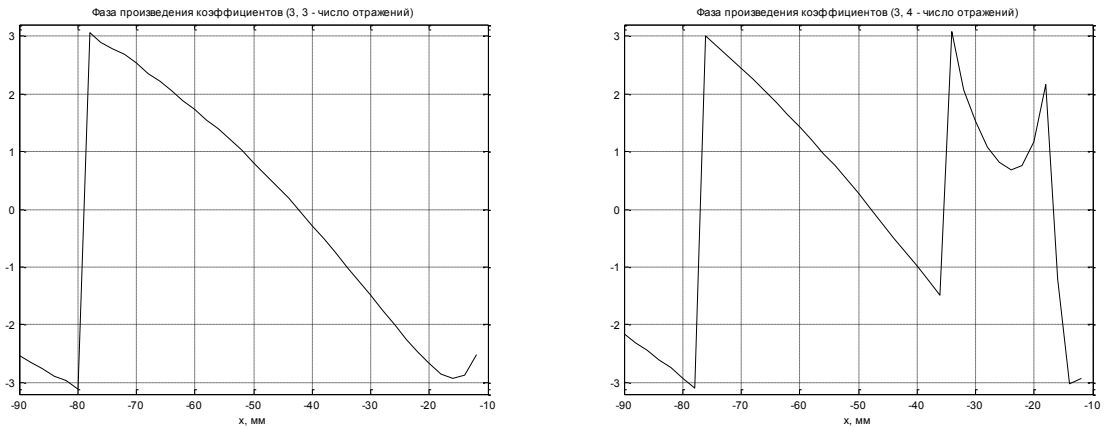


Рис. 4 Фазы коэффициента для схемы **TBT(SSS)-TBT(SSS)** (слева) и **TBT(SSS)-TBTB(SSSS)** (справа) при сканировании по поверхности в совмещённом режиме.

Если не учитывать это обстоятельство, то эхосигналы на части апертуры будут складываться в противофазе с сигналами с другой части. В результате фронтальная разрешающая способность изображения и отношение сигнал/шум может значительно уменьшиться. Отметим, что для антенной решётки, апертура которой равна примерно 20 мм, учёт изменения фазы при отражении от границы не принципиален. Но если апертура измеряется несколькими десятками миллиметров, то учёт фазы может существенно повысить качество изображения отражателей по акустическим схемам с отражением от границ объекта контроля. Поэтому алгоритм (3), учитывающий только фазу для заданной акустической схемы, нужно модифицировать следующим образом

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; \{c_t\}, \{c_r\}) = \iint_{S_t, S_r} p_H(\mathbf{r}_r, t - t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t; \{c_t\}, \{c_r\}) + t_{max}) \frac{A(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}; \{c_t\})A(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}; \{c_r\})}{|A(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}; \{c_t\})A(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}; \{c_r\})|} d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_t, \quad (8)$$

где $p_H(\mathbf{r}_r, t)$ комплексные эхосигналы, полученные из измеренных эхосигналов $p(\mathbf{r}_r, t)$ с помощью преобразования Гильберта. Для получения изображения отражателей нужно взять модуль функции $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; \{c_t\}, \{c_r\})$.

2.4. Метод M-S-CAFT и TS-M-C-SAFT

Метод получения высококачественных изображений по многим акустическим схемам рассмотрен в статье [14] и назван в ней методом M-S-CAFT. Он представляет собой упрощённый вариант корреляционной обработки (2), когда функция $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t, t)$ рассчитывается для всех возможных акустических схем. Итоговое изображение отражателя определяется как модуль когерентной суммы парциальных оценок $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; \{c_t\}, \{c_r\})$ для списка независимых и значимых акустических схем $\{L_{as}\}$ длиной N_{as} по формуле

$$I(\mathbf{r}_i) = \left| \sum_{\{L_{as}\}} \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; \{c_t\}, \{c_r\}) \right|. \quad (9)$$

Если антенная решётка перемещается N_s раз для разных значений вектора \mathbf{r}_s , то добавив когерентное суммирование изображений, восстановленных для каждого положения антенной решётки, можно получить объединённое (итоговое) изображение отражателей с ещё более высокой фронтальной разрешающей способностью по формуле

$$I(\mathbf{r}_i) = \left| \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{\{L_{as}\}} \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s; \{c_t\}, \{c_r\}) \right| \quad (10)$$

К сожалению, воспользоваться формулой (9) или (10) на практике довольно сложно по причине того, что в объекте контроля не известны с необходимой точностью ни скорости продольной и поперечной волны, ни его толщина. Чем на большем расстоянии от антенной решётки нужно восстанавливать изображение и чем больше отражений от границ нужно учесть, тем с более высокой точностью должны быть известны скорости. В статье [15] сделана оценка требуемой точности измерения скоростей, которая должна быть не меньше чем 0.5%. Это очень высокая точность измерений, которая усугубляется тем, что толщина реального объекта контроля, как правило, известна лишь приблизительно. Поэтому формулу (10) можно модифицировать, введя не простое сложение (когерентное или по модулю), а логическое сложение, которое выполняется следующим образом. Для каждого парциального изображения, число которых равно $N_{as}N_s$, вводится уровень отсечки равный его среднему значению плюс три дисперсии. Если в точке \mathbf{r}_i отличны от нуля значения не менее чем в N_l парциальных изображений, то в точку объединённого изображения записывается сумма модулей всех парциальных изображений. В противном случае итоговое значение в точке \mathbf{r}_i полагается равным нулю. Такой примитивный подход позволяет существенно уменьшить амплитуды ложных бликов, но, с другой стороны он несет в себе опасность пропустить блики от реальных отражателей. Как показал опыт, значение параметра N_l целесообразно выбирать равным $N_{as}N_s / 3$. Таким образом, фор-

мула формирования итогового изображения с помощью логического сложения парциальных изображений может быть записана так

$$I(\mathbf{r}_i) = \begin{cases} \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{\{L_{as}\}} |\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s; \{c_t\}, \{c_r\})|, & \text{если } \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{\{L_{as}\}} \text{sign} |\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s; \{c_t\}, \{c_r\})| \geq N_l, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (11)$$

3. Численные эксперименты

Для проверки работоспособности алгоритма восстанавливались изображения отражателей по эхосигналам, рассчитанным с помощью программы CIVА [16]. На Рис. 5 показан вид образца в виде трубы внешним радиусом 170 мм и толщиной 20 мм с прямоугольным дефектом высотой 5 мм. Полагалось, что антенная решётка типа РЕ-5М32Е0.8Р установлена на 35-и градусную призму из рексолита. Эмулировалась регистрация эхосигналов в режиме тройного сканирования, когда антенная решётка перемещалась 21 раз с шагом 7.8 мм вдоль поверхности образца.

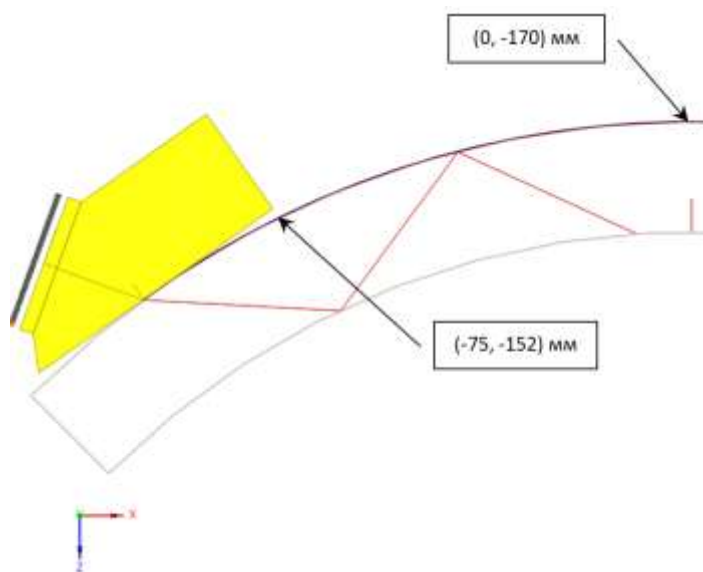


Рис. 5 Схема проведения численного эксперимента в программе CIVА. Призма показана в крайнем левом положении на апертуре сканирования.

При восстановлении изображений по формуле (10) для одной акустической схеме **T(S)-T(S)** использовались эхосигналы, измеренные в режиме тройного сканирования, во всех 21-ого положения антенной решётки. Так как все параметры проведения численного эксперимента известны, то когерентная сумма парциальных изображений должна дать лучший результат. На нижнем ряду рисунка Рис. 6 видно, что без учёта радиуса кривизны

апертуры блики парциальные изображения сместились от своего истинного положения, что привело к полному «рассыпанию» их когерентной суммы. Но если при восстановлении изображения учитывать радиус образца равный 170 мм, то суммарное изображение (верхний ряд Рис. 6) достаточно точно соответствует форме дефекта. Это объясняется большими размерами апертуры сканирования антенной решёткой и малым радиусом кривизны, из-за чего при крайних левых положениях антенной решётки лучи зеркально отражаются и принимаются от поверхности трещины, а не только от её границ. На Рис. 6 в левом ряду показаны парциальные изображения для одного положения антенной решётки. На изображении, восстановленном без учёта радиуса кривизны линии сканирования, блики, соответствующие вершине и корню модели трещины, смещены более чем на 2 мм от своего истинного положения.

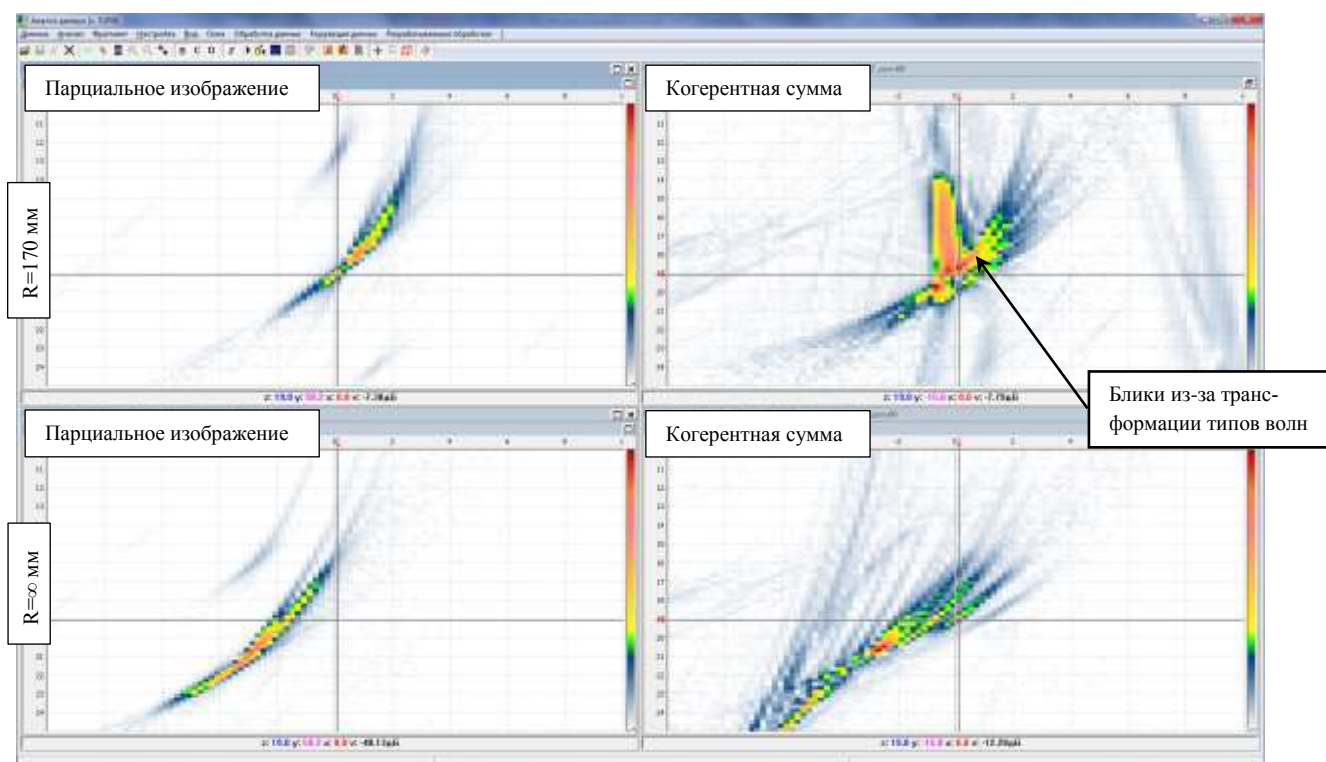


Рис. 6 Изображение В-типа модели трещины, восстановленное по акустической схеме $T(S)-T(S)$ при учёте радиуса кривизны поверхности (верхний ряд) и без учёта (нижний ряд).

Изображения, подобные представленным на Рис. 7, можно получить и по акустической схеме $T(L)-T(L)$. Объединённое изображение было получено как когерентная сумма всех парциальных изображения для всех положений антенной решётки. Видно, что без учёта радиуса кривизны апертуры блики парциальные изображения сместились от своего истинного положения, что привело к полному «рассыпанию» их когерентной сум-

мы (нижний ряд Рис. 7). Если при восстановлении изображения учитывать радиус трубы, то суммарное изображение соответствует форме отражателя.

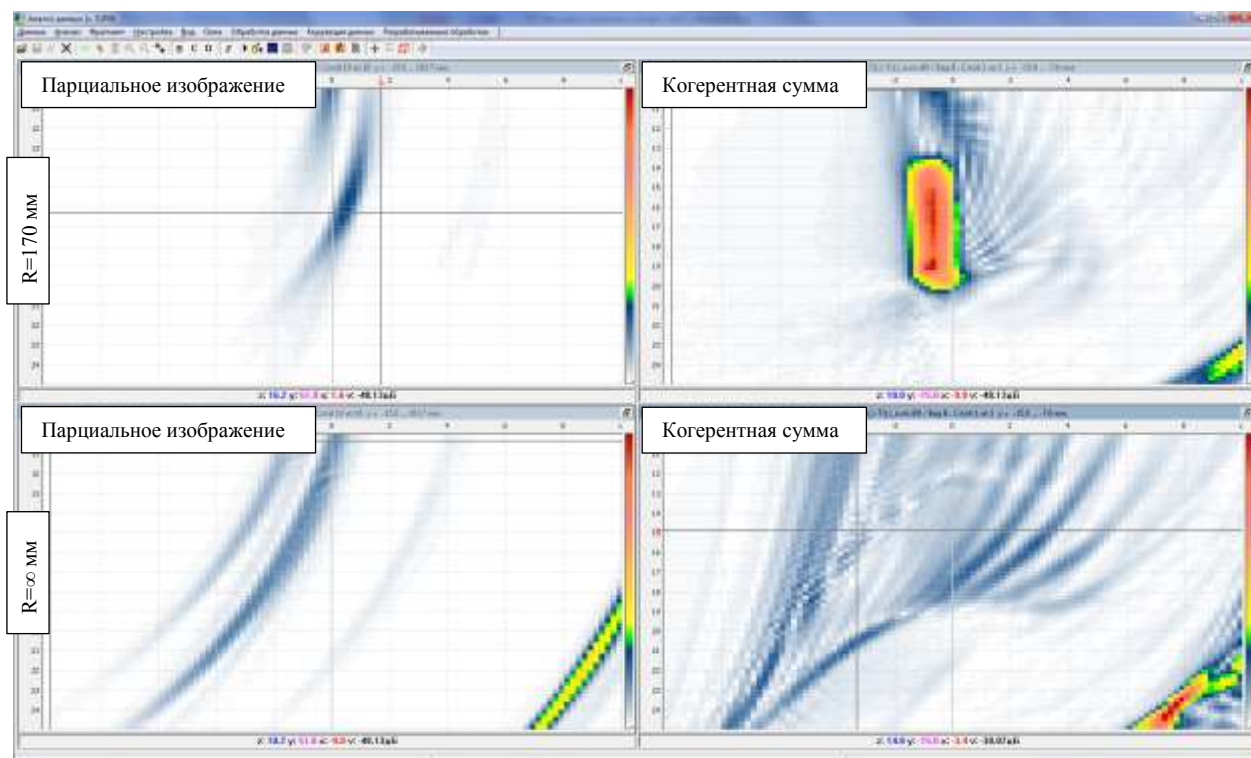


Рис. 7 Изображение В-типа модели трещины, восстановленное по акустической схеме **T(L)-T(L)** при учёте радиуса кривизны поверхности (верхний ряд) и без учёта (нижний ряд).

4. Модельные эксперименты

Измерения эхосигналов в режиме двойного сканирования проводились ФАР-дефектоскопом «**X-32**» с помощью антенной решётки PE-5M32E0.8P (апертура 32×0.8 мм) на 5 МГц размещённой на рексолитовой призме T1-35WOR-1 с углом наклона $\beta_y = 35$ градусов. Восстановление изображения моделей дефектов проводилось с помощью когерентного ультразвукового дефектоскопа серии «**АВГУР АРТ**», разработанного и изготовляемого в «**Научно-производственном центре «ЭХО+**».

4.1. Изображения модели вертикальной трещины в образце с плоскопараллельными границами

Восстанавливалось изображение модели придонной трещины высотой 8 мм раскрытием 0.2 мм, изготовленной в стальном образце толщиной 18 мм с плоскопараллельными границами. Измерения проводились в режиме тройного сканирования для двадцати положений антенной решётки с шагом 4 мм. В верхнем ряду на Рис. 8 показаны изображения, восстановленные по акустической схеме **TBT(SSS)-TBT(SSS)** без учёта фазы при

отражении от границ образца, а в нижнем при учёте фазы по формуле (8). На рисунок линиями чёрного цвета наброшена маска образца. Видно, что изображение, полученное с учётом изменения фазы при отражении от границ образца, имеет фронтальную разрешающую способность в три раза выше, нежели изображение, восстановленное без учёта изменения фазы. Следует отметить, что блик вершины трещины восстановлен примерно на 0.5 мм ниже своего правильного положения. Продольная и поперечная скорости звука в данном образце были измерены с точностью не менее 0.5%, его толщина была измерена электронным штангенциркулем с точностью не менее чем 20 мкм. Поэтому причина смещения блика, возможно, заключается в том, что паспортные данные призмы и антенной решётки гарантируют точность определения координат первого элемента антенной решётки с ошибкой +0.6 мм. Если реальные координаты первого элемента отличаются от паспортных значений координат, заданных при восстановлении, то это приведёт к смещению блика вершины пропила. Поэтому следует разработать методику калибровки конкретной антенной решётки на конкретной призме, чтобы точность определения координат первого элемента была, как минимум, четверть длины волны.

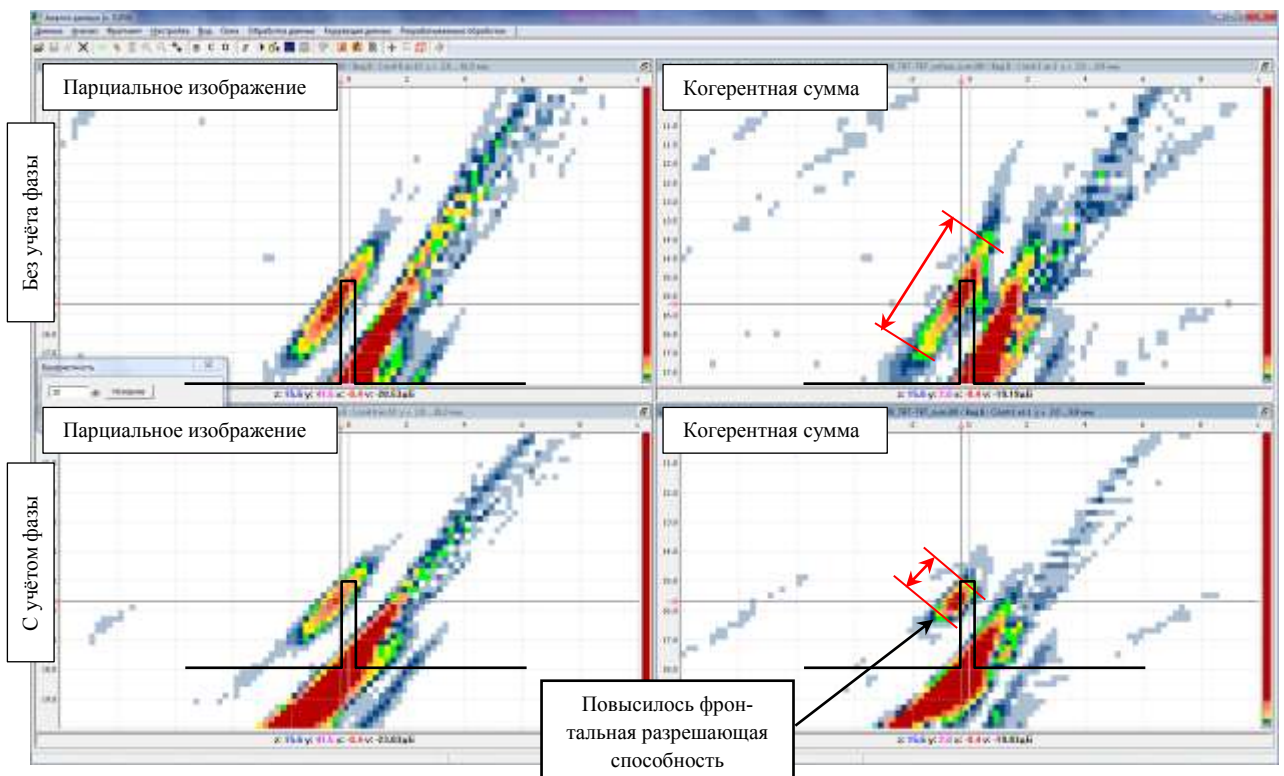


Рис. 8 В верхнем ряду показаны изображения В-типа восстановленные по схеме **TBT(SSS)-TBT(SSS)** без учёта фазы при отражении от границ образца, а в нижнем при учёте фазы коэффициента $V(\alpha_n; c_{t,n}, c_{t,n+1})$.

Таким образом, можно утверждать, что учёт изменения фазы в формулах (8) и (11) позволяет существенно повысить фронтальную разрешающую способность изображений восстановленных по акустическим схемам с отражением от границ объекта контроля.

С помощью методики описанной в разделе 2.2 по уровню 0.2 были определены 32 значащих и независимых акустических схем. Все восстановленные парциальные изображения были подвергнуты операции отсечки по уровню равному значению медианы плюс три дисперсии парциального изображения. Объединённые изображения были получены с помощью логического сложения 32-ух парциальных изображений ($N_l = 11$), а случае акустических схем только для поперечных волн при логическом сложении 15-и изображений ($N_l = 5$). На Рис. 9 показаны парциальные изображения, полученные как когерентная сумма (левый ряд) и как сумма модулей парциальных изображений (правый ряд) при анализе всех 32 акустических схем и при анализе 15 схем по поперечным волнам. Видно, что самое лучшее отношение сигнал/шум и высокое разрешение обеспечивает когерентное логическое сложение всех изображений, восстановленных по 32-ум акустическим схемам.

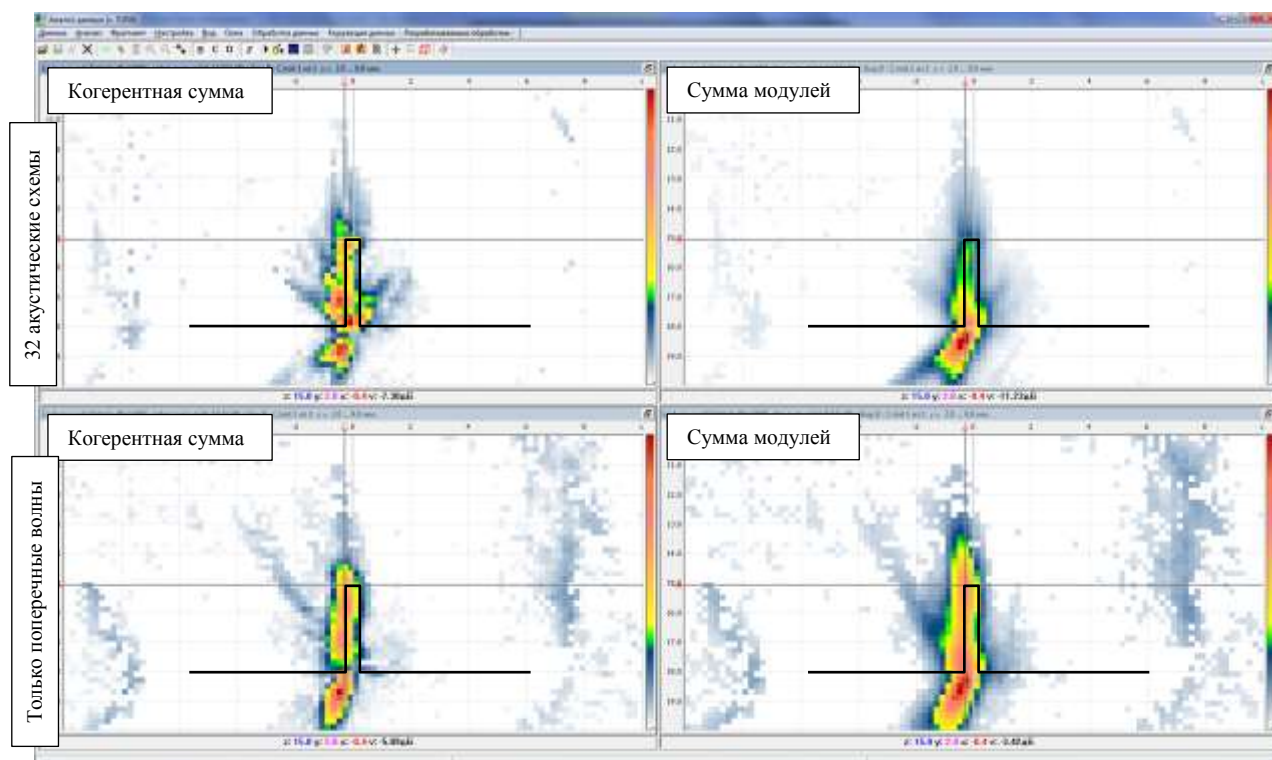


Рис. 9 Изображение В-типа модели трещины высотой 3 мм, полученное при разных способах объединений парциальных изображений.

4.2. Изображения моделей трещин в образце трубопровода Ду720

Образец представлял собой фрагмент трубы диаметром 720 мм и толщиной стенки 9 мм с продольным сварным соединением, имеющим на внешней и внутренней поверхности валики усиления, которые отмечены на Рис. 10 прямоугольником с градиентной заливкой. В образце было сделано десять искусственных дефектов: два в виде отверстий бокового сверления диаметром 4 мм на глубине 5 мм (обозначены цифрами 1 и 10), три в виде поверхностных пропилов, расположенных у дна (отмечены пунктирными линиями красного цвета и цифрами 6, 7 и 8). Три пропила были выполнены у поверхности (отмечены линиями красного цвета и цифрами 3, 4 и 5). Пропилы имели длину около 55 мм и высоту около 2 мм. В образце были сделаны модели поперечных дефектов в виде пропилов с внешней (отмечен цифрой 9) и с внутренней (отмечен цифрой 2) стороны образца.

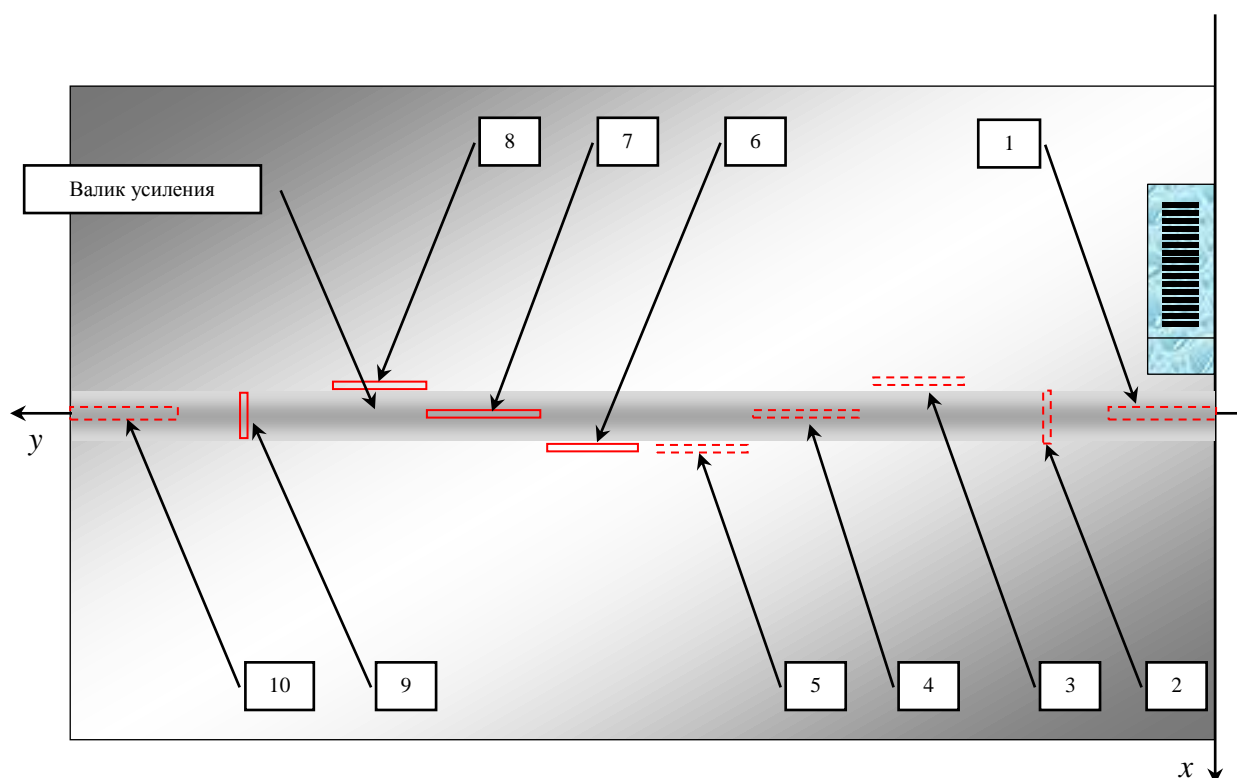


Рис. 10 Схематическое изображение образца Ду720, заложенных в нём дефектов и положения антенной решётки на призме в начале области сканирования.

Передняя грань призмы находилась на расстоянии -25 мм от центра валика усиления. Как упоминалось выше для эффективного сложения парциальных изображений нужно учитывать радиус окружности образца. По методике, описанной в разделе 2.2, были

определены независимые и значащие схемы, каковых оказалось только 26. На Рис. 11 показаны парциальные изображения В-типа дефекта №3, полученные по двенадцати акустическим схемам на поперечных волнах. Хорошо видно, что на каждом изображении есть блик соответствующий пропилу, сделанному у дна образца, а на некоторых изображениях имеются ложные блики, которые при анализе только одного изображения могут быть приняты за блики от реального дефекта, что может привести к перебраковке.

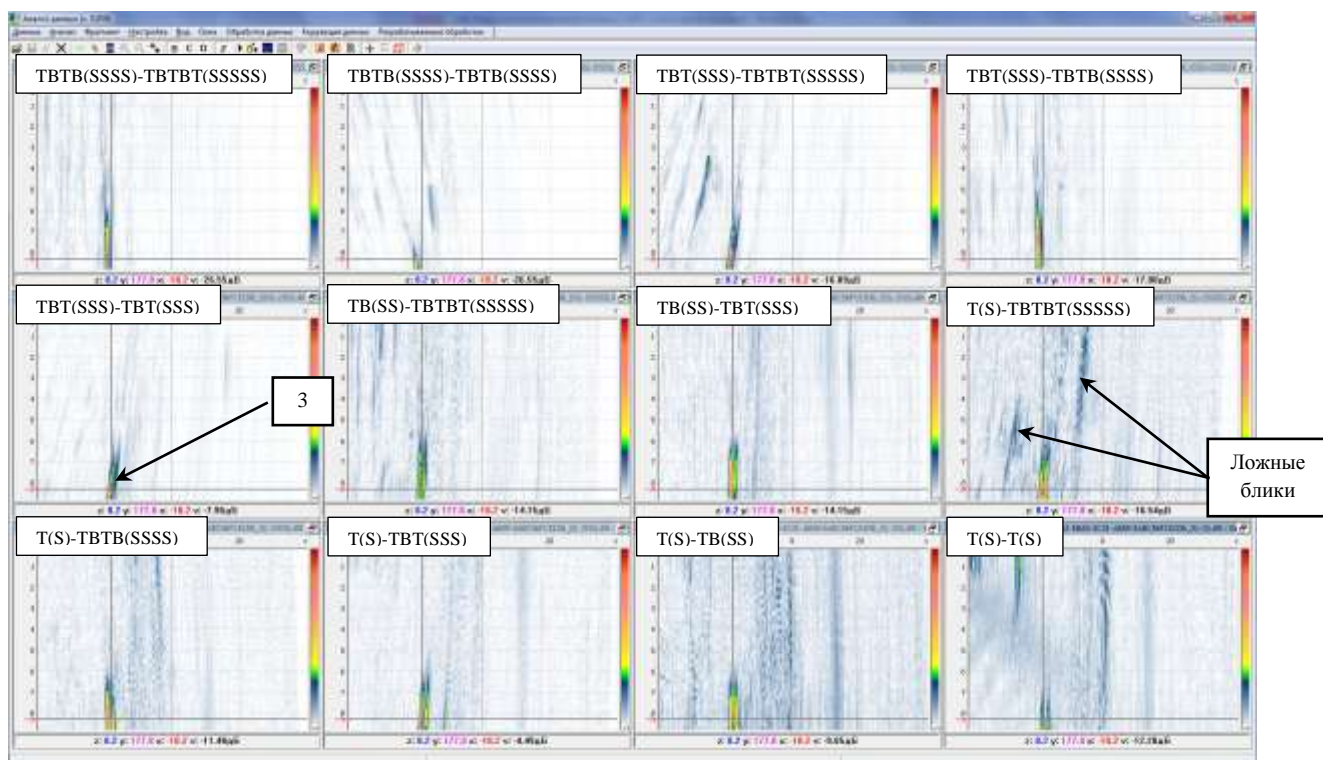


Рис. 11 Изображения В-типа дефекта №3 восстановленные по разным акустическим схемам.

На Рис. 12 показаны срезы изображения В-типа в области залегания дефекта №3. Верхнее изображение получено после логического сложения по формуле (11) всех 26-и парциальных изображений ($N_l = 9$), среднее – при логическом сложении 15-и парциальных изображений ($N_l = 5$) по акустическим схемам только на поперечной волне. Внизу показано парциальное изображение, восстановленное по схеме **TBTB(SSSS)-TBTB(SSSS)**. Эта акустическая схема выбрана по причине того, что изображение дефекта №3 формируется лучами, отражающимися в основном от ровных границ стенки трубы, благодаря чему дефект хорошо виден. На изображениях полученных после логического сложения высоту пропила можно оценить как 2 мм, в то время на парциальном изображении, восстановлен-

ном по схеме **TBTB(SSSS)-TBTB(SSSS)**, можно констатировать лишь наличие отражателя очень малой высоты.

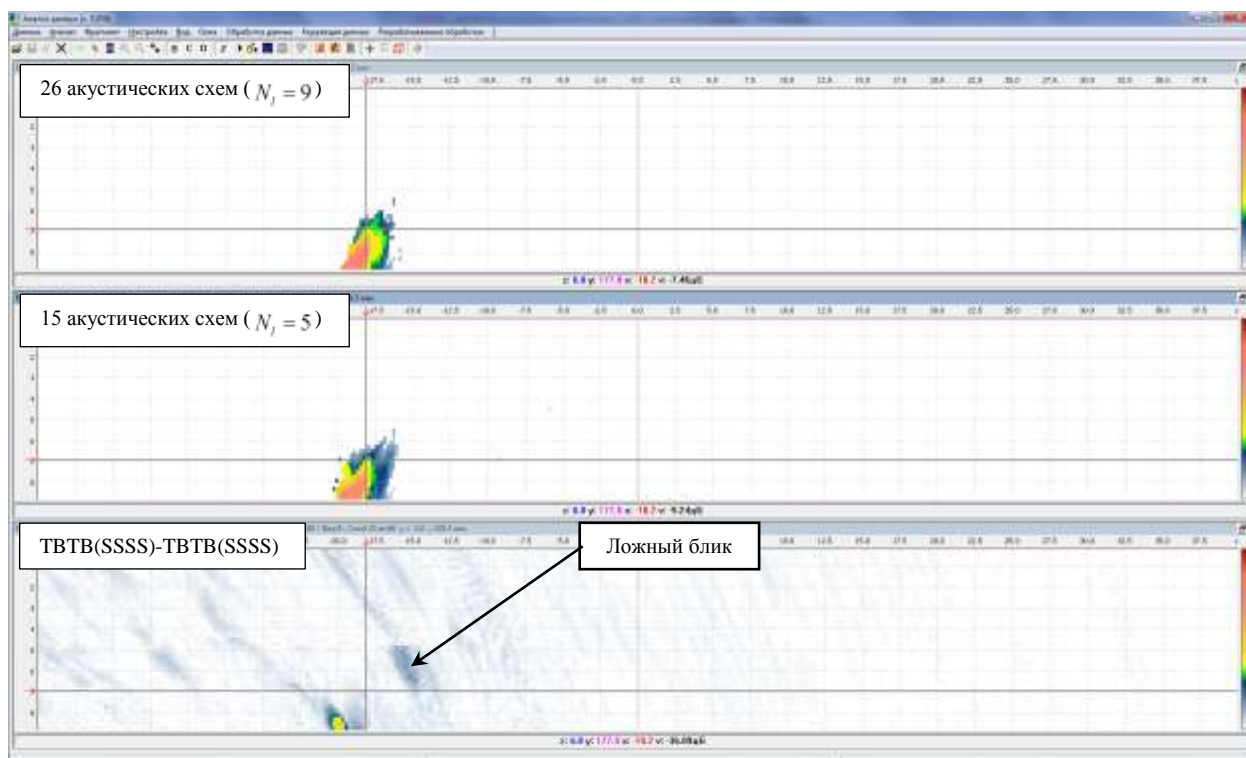


Рис. 12 Изображения В-типа дефекта №3 полученные логическим сложением по разным акустическим схемам и парциальное изображение по схеме **TBTB(SSSS)-TBTB(SSSS)**.

На Рис. 13 показаны изображения С-типа. Для повышения информативности изображения исходный куб чисел трансформирован в матрицу при замене строки вдоль оси z её максимальным значением. Изображение слева получено после логического сложения всех 26-и парциальных изображений ($N_l = 9$), среднее – при логическом сложении 15-и парциальных изображений ($N_l = 5$) по акустическим схемам только на поперечной волне. Справа показано парциальное изображение, восстановленное по схеме **TBTB(SSSS)-TBTB(SSSS)**, на котором хорошо виден дефект №5. На изображениях полученных после логического сложения уверенно видны дефекты №№1, 3, 4, 7 и 8. Низкое качество изображения дефектов №5 и №6, объясняется тем, что они расположены за валиками усиления в образце Ду720 и их изображение некорректно восстанавливать по алгоритму, рассчитанному на работу с образцами с постоянной толщиной стенок. Отметим, что поперечный дефект №2 совершенно не виден на одном изображении.

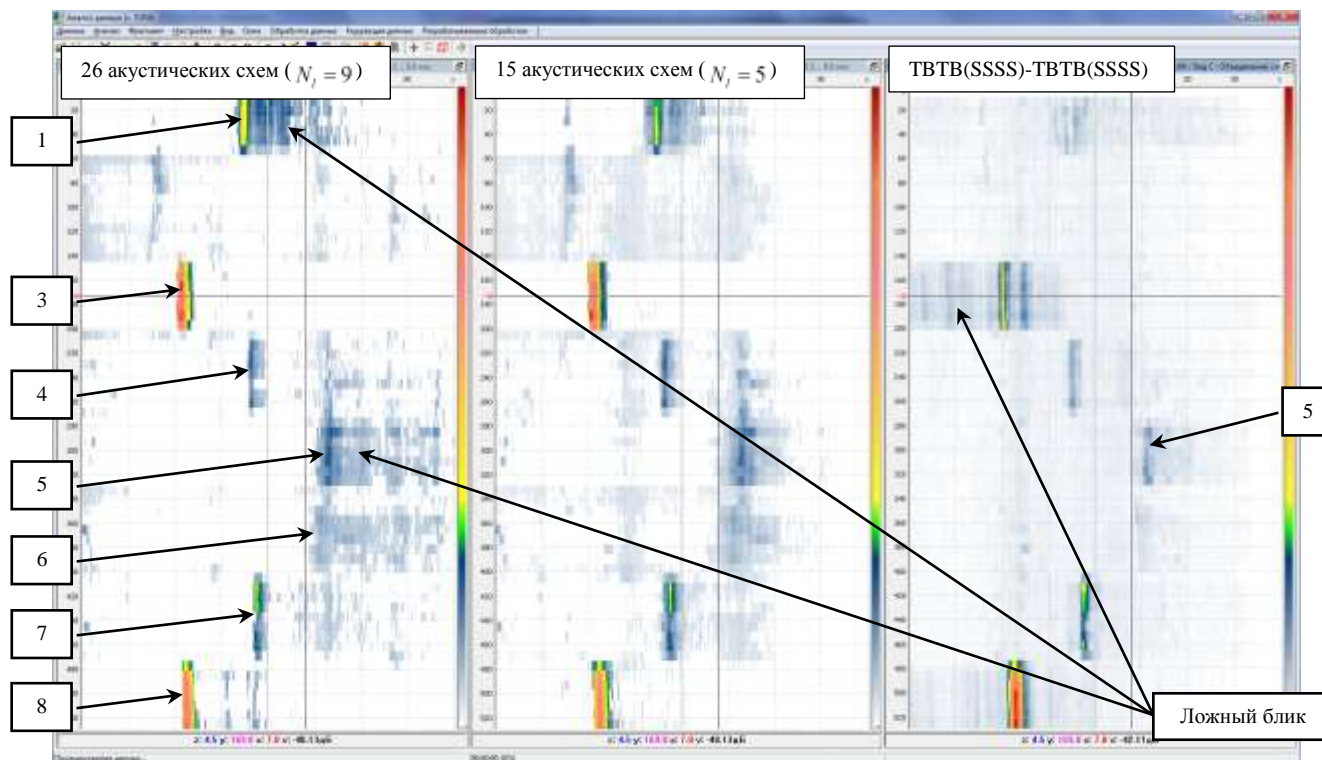


Рис. 13 Изображения С-типа полученные логическим сложением по разным акустическим схемам и частичное изображение по схеме **ТВТВ(SSSS)-ТВТВ(SSSS)**.

На Рис. 14 показан срез изображения В-типа в области залегания отверстия бокового сверления, которое схематически изображено на рисунке окружностью розового цвета. Верхнее изображение получено после логического сложения всех 26-и парциальных изображений ($N_l = 9$), среднее – при логическом сложении 15-и парциальных изображений ($N_l = 5$) по акустическим схемам на поперечных волнах. Внизу показано парциальное изображение, восстановленное по схеме **ТВТВ(SSSS)-ТВТВ(SSSS)**. На изображениях полученных после логического сложения угадывается фрагмент границы отверстия, в то время на парциальном изображении, восстановленном по схеме **ТВТВ(SSSS)-ТВТВ(SSSS)**, блик границы отверстия практически незаметен и вдобавок смещён от своего правильного положения из-за неизвестных скоростей звука и толщины. На изображении, полученном только по поперечным волнам, амплитуда ложных бликов более чем на 6 дБ меньше чем при сложении всех 26-и парциальных изображений.

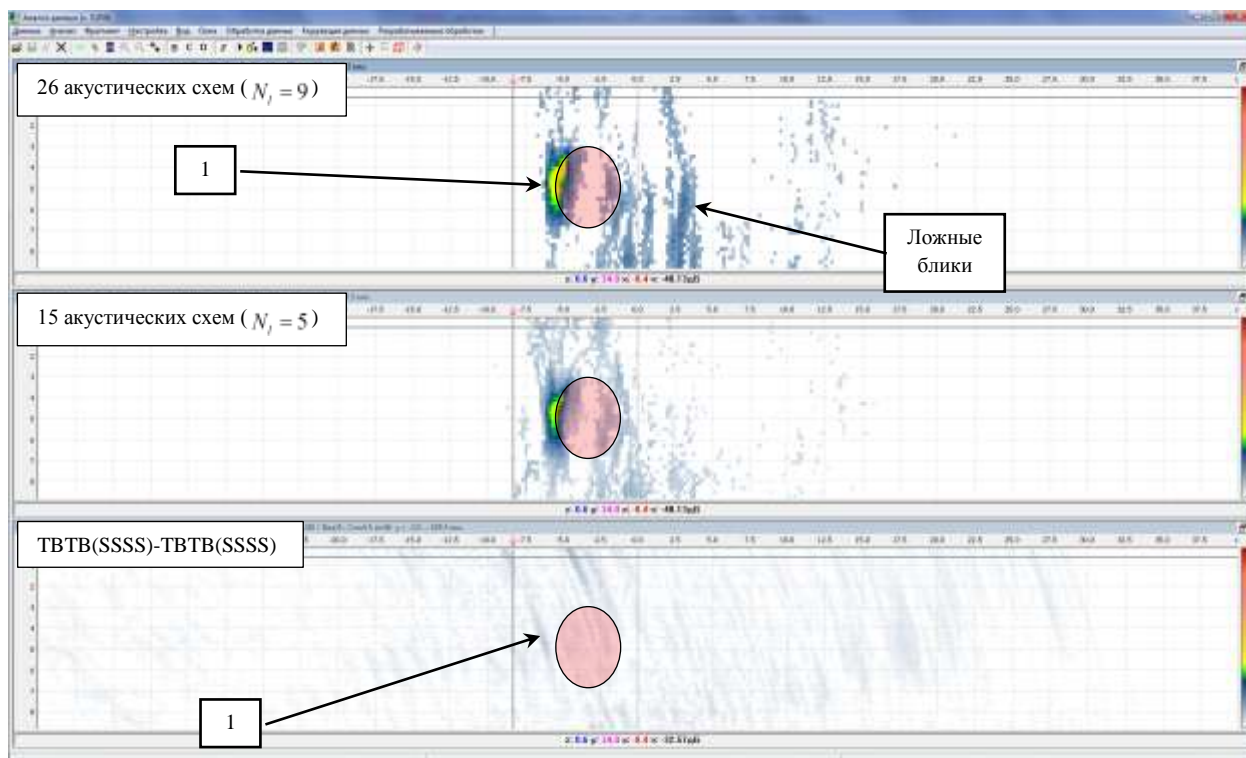


Рис. 14 Изображения В-типа дефекта №1 полученные логическим сложением по разным акустическим схемам и парциальное изображение по схеме **ТВТВ(SSSS)-ТВТВ(SSSS)**.

5. Выводы

Результаты проведённых исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Изображение, восстановленное методом TS-M-C-SAFT с учётом изменения фазы коэффициента отражения от границ образца, имеет фронтальную разрешающую способность в три раза выше, нежели изображение, восстановленное без учёта изменения фазы.
2. Для уменьшения количества акустических схем необходимых для восстановления изображения введено понятие независимых и значимых акустических схем. Это позволяет более чем на порядок уменьшить число акустических схем, используемых для восстановления изображения отражателей. Без этого ограничения число акустических схем для восстановления изображения методом TS-M-C-SAFT может оказаться очень большим и для проведения расчётов потребуется очень много времени.
3. Модельные эксперименты показали, что при восстановлении методом M-C-SAFT изображения пропилов в образце трубопровода Ду720 с учётом пяти отражений, можно определить тип отражателей, их размеры и глубину залегания.
4. Точности задания координат первого элемента может оказаться не достаточно для восстановления изображения отражателей на нужной глубине. Поэтому необходимо раз-

работать методику калибровки конкретной антенной решётки на конкретной призме, чтобы точность определения координат первого элемента была, как минимум, четверть длины волны.

Автор выражает признательность начальнику лаборатории «НПЦ «ЭХО+» Базулину А.Е. за замечания, высказанные в процессе обсуждения статьи, а также сотрудникам «НПЦ «ЭХО+» Коколеву С.А. и Заушыщину А.В. за проведение измерений в образце Ду-720.

6. Список литературы

- 1 Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA : Olympus NDT, 2007. <http://www.olympus-ims.com/en/books/>
- 2 ФАР- и ЦФА-дефектоскоп «**MULTIX POCKET 64x64**», <http://www.m2m-ndt.com/products-1-25-en.html>
- 3 ФАР-дефектоскоп «**OMNISCAN MX**», <http://www.olympus-ims.com/ru/omniscan-mx/>
- 4 ФАР-дефектоскоп «**ISONIC 2009**», <http://www.sonotronndt.com/i2009.htm>
- 5 Базулин Е.Г., Голубев А.С., Коколев С.А. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов. - Дефектоскопия, 2009, №2, с. 18-32.
- 6 Chatillon S, Fidahoussen A, Iakovleva E, Calmon P Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models. – NDT in Canada 2009 National Conference, Aug 25-27, 2009.
- 7 Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция. Дефектоскопия, 1990, № 2, с. 29-41.
- 8 Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решёток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов. - В мире неразрушающего контроля, №1 (51), март 2011, с. 64-70
- 9 Высокочастотный ультразвуковой томограф «**A1550 IntroVisor**», http://acsys.ru/production/?type_id=16&subtype_id=7&product_id=106
- 10 Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решётки или фазированные антенные решётки. – Дефектоскопия, 2012 (в печати)
- 11 Кравцев Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. - М.: Наука. 1980. с. 304.
- 12 Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль. – В кн.: Неразрушающий контроль / Справочник / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. – М.: Машиностроение. 2004. 864 с.
- 13 Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. Изд.2, испр. М.: Наука, 1973. 720 с.
- 14 Базулин Е.Г. Определение типа дефекта по изображениям, полученным методом C-SAFT с учетом трансформации типов волн при отражении ультразвуковых импульсов от неровных границ объекта контроля. – Дефектоскопия, 2011, №1, с. 39-56.

15 Базулин Е.Г. Получение изображений дефектов когерентными методами с учетом многократного отражения от плоскопараллельных границ объектов контроля при ультразвуковом контроле. - Дефектоскопия, 2007, №7, с. 48-70.

16 Официальный сайт CIVA, - <http://www.extende.com/civa-2>